加熱水平円柱近傍上方の自然対流場に関する一研究*

木本 日出夫**, 桃瀬 一成***

A Study of a Natural Convection Field Right Above a Heated Horizontal Circular Cylinder

by Hideo KIMOTO and Kazunari MOMOSE

Natural convection fields right above a heated horizontal circular cylinder have been examined mainly by a hot-wire anemometer calibrated for the thermal effect in a rather low air flow range, using a two-dimensional (temperature-velocity) spline function. As a result the following facts have been revealed: (1) The interpolation by a two-dimensional spline function is applicable for the calibration of a hot-wire anemometer in a rather low velocity region. (2) There is a somewhat undeveloped convection region in the natural convection field right above a heated horizontal circular cylinder. These facts are ascertained by means of a laser-doppler velocimeter and by a flow visualization method using a smoke-wire. Moreover, they are ascertained by a numerical calculation of the natural convection field, too.

Key Words: Convective Heat Transfer, Natural convection Field, Horizontal Circular Cylinder, Hot-Wire Anemometer, Thermal Compensation

1. ま え が き

加熱円柱近傍における自然対流の温度場および速度場の観測ならびに測定は古くから試みられており, 前者についてはマッハ・ツェンダ干渉計等の可視化により対流場全体にわたりよく知られているが⁽¹⁾, 速度場に関しては円柱下方, 側方⁽²⁾を除いてあまり報告されておらず, 特に円柱近傍上方についてはほとんど見当たらない。

加熱円柱近傍の自然対流場の局所的な流速を測定する方法としては現在のところ熱線流速計あるいはレーザ・ドップラ流速計(以下LDV)が最も有力であると考えられるが, 前者は流体の温度変化の影響を低流速部で大きく受け, 市販されている熱線流速計の測温ユニット・リニアライザ系の調整も加熱物体近傍の自然対流場のような流速が非常に小さく, かつ温度が急変するような場の測定では非常に難しい。また後者は測定円柱近傍の後流中にトレーサ粒子を自然対流場を乱すことなく十分に浮遊させにくいという問題がある。

本研究ではこれらの流速計のうち主に熱線流速計を, 測温ユニット・リニアライザ系を使わずに低流速部を中心に温度補償を含めた較正を行うことによって加熱円柱近傍上方の流速測定に適用した。この較正は検定用風洞内の流速, 温度およびそのときの熱線流速計出力の関係を二次元スプライン関数⁽³⁾で補間することにより行ったが, このようにして低流速域で較正した熱線流速計を用いて測定した加熱円柱上方の自然対流流速分布をスモーク・ワイヤ法⁽⁴⁾によって得られた結果および数値計算結果と比較した。また自然対流の鉛直方向成分に関してはLDVによって得られた結果と比較し, 本報の方法による熱線流速計の測定結果がほぼ満足できる値であることを確認した。その結果, 円柱中心近傍上方において低流速域が存在することを確認し, 円柱頂部において自然対流局所熱伝達率が非常に小さくなることを流れ場からも説明した。

記 号

E: 熱線流速計の出力電圧

E₀: 無風時の熱線流速計出力電圧F_s: 3次の二次元B-スプライン関数N_u: 局所ヌセルト数

R: 円柱半径

* 昭和61年6月27日 北陸信越支部北陸地方(金沢)講演会において講演, 原稿受付 昭和60年11月25日。

** 正員, 大阪大学基礎工学部 (〒560 豊中市待兼山町1-1)。

*** 正員, 大阪大学大学院。

- R_a : レーレー数
 T : 流体温度
 t : スモーク・ワイヤ発煙後の経過時間
 T_a : 室温
 U : 流速
 U_z : 鉛直方向流速成分
 X : 円柱中心軸を基準とした水平方向座標
 Z : 円柱中心軸を基準とした鉛直方向座標
 α : 温度伝導率
 θ : 鉛直下方を零度とした角度
 Ψ : 流れ関数
 ψ : 無次元化流れ関数 $= \Psi/\alpha$

2. 温度補償を含めた熱線流速計の校正

2.1 校正装置および方法 本校正に使用した校正装置のブロック図を図1に示す。風洞は軸流ファン①を用いた吹出形で整流部の前にヒータ③を挿入しており、これらのファンの回転数およびヒータの発熱量を電力制御器②、④を用いて制御することにより数 cm/s 以上の流速および 60°C 程度までの流体温度に設定可能である。測定部は内寸法 80×80 mm、長さ 300 mm のアクリル製矩形断面流路で整流網から 100 mm の位置に熱線プローブ⑦と測温プローブ⑧を流路中心部に挿入している。これらの熱線および測温線は線径 5 μ m のタングステン線で、それぞれ定温度形

1. blower
2. variable voltage AC power supply
3. heater
4. variable voltage AC power supply
5. grid for low turbulence
6. mesh screen for low turbulence
7. hot-wire probe
8. cold-wire probe
9. laser
10. beam splitter & focusing lens
11. focusing lens & photo detector
12. constant temperature anemometer (CTA)
13. temperature unit
14. frequency tracker
15. signal analyzer
16. A/D converter unit
17. microcomputer system

図1 校正装置ブロック図

熱線流速計⑩および測温ユニット⑬に入力した後、シグナル・アナライザ (12 bit A/D コンバータ) ⑮を介してマイクロコンピュータ⑰に取り込む。また、測定部主流の流速測定には LDV システム⑨～⑪を使用し、流路中心部の主流方向速度を測定する。このドップラ信号は周波数トラッカ⑭で電圧値に変換した後 A/D コンバータ⑮を介してマイクロコンピュータに取り込んだ。なお、LDV のトレーサ粒子には線香の煙を用いたが、熱線プローブへの影響を最小限にとどめるため、プローブ装着前のみ必要最小限の煙を発生させ、装着後は室内の残留煙のみとした。

2.2 校正結果および考察 前節の方法により流速 $5 < U < 50$ cm/s、温度 $27^\circ\text{C} < T < 55^\circ\text{C}$ の範囲でできるかぎり U - T 平面内で測定データが偏らないように熱線流速計出力および測温ユニット出力をサンプリング周波数 500 Hz、サンプリング数 512 で測定し、その測定の前後で LDV によって得られた流速値とともにコンピュータに取り込んだ。ただし流速零の場合については図1に示した検定風洞を用いず、電気炉内に熱線プローブをガラスビーカー内に入れて栓をした状態でセットし、炉内温度を変化させて測定した。このとき同時に測温プローブの校正も行っている。

このようにしてサンプリングしたデータから、熱線流速計の平均出力電圧 E 、平均温度 T および平均流速 U を求め、 E 、 T を 2 変数とした 3 次の B-スプライン補間を用いることによって $U = F_3(E, T)$ なる校正曲面を計算機内に作成した。その一例を E - U 平面への写像図として図2に示す。図2より、もし温度補償を行わなければ、同流速でも 10°C の温度変化により 10 cm/s 以上の速度差が生じることになり、自然対流のように低流速で温度変化の大きい流れでは非常に大きな誤差原因になると考えられる。図3はスプライン補間結果を代表的な温度に対して実測値および従来の King の式と比較したもので周知のごとく⁽⁵⁾約 10

図2 二次元 B-スプライン補間による校正結果例

cm/s 以下の低流速域では King の式では十分な精度が得難く考えられる。なお King の式の定数は室温 (27°C) における E と U の関係から決定した。

熱線流速計で用いられる熱線は非常に細く、また高温 (本研究の場合約 200°C) で使用されるため経時変化が生じると考えられる。図 4 (a) はその一例を示したものであり、この間に中間較正 (Test 2) を含む約 45 時間の測定を行っている。同図が示すようにこの場合

図 3 二次元 B-スプライン補間および King の式による較正結果の比較

(a)

(b)

図 4 熱線の経時変化例

の経時変化は流速値にして 10 cm/s 程度あり、低流速測定時には無視できない。これを T と E^2 を変数として U をスプライン補間から求めて図示したのが図 4 (b) であるが、King の式から予想されるように T と E^2 はほぼ直線関係にあり、経時変化が生じて各流速間の関係は変化しないと思われる。そこで、各流速における E^2 と流速零のときの E^2 (すなわち E_0^2) との差を求めて、温度との関係として図 5 に示した。図 5 によると、 $E^2 - E_0^2$ は経時変化にほとんど影響されず、この間に得られた流速測定結果に対して有効な較正曲面として使用できるものと考えられる。ここでこの較正曲面を使用する際、測定中の E_0^2 と T の関係が既知である必要があるが、図 4 (b) の $U=0$ から E_0^2 は T の一次関数で表せ、その一次の係数の経時変化がほぼ無視できることから、測定時に流速零の状態における E (すなわち E_0) と T の値を一回測定しておくことにより E_0^2 と T の関係を決定することができる。

次章以下の流速測定ではこのようにして得られた $U = F_0(E^2 - E_0^2, T)$ なる較正曲面を用いることによって流速を算出している。

3. 加熱円柱近傍上方の自然対流場

3.1 測定装置および方法 本研究では加熱円柱上方の流速を、前章に述べた方法により測定した。図 6 にそのときの円柱および各プローブの設置状況を示す。円柱は直径 20 mm、厚さ 1 mm の黄銅製円管よりなり、内部に電気ヒータを組み込んだ電気加熱式で加熱部長さは 100 mm である。この円柱の軸方向中心部上方に図に示すように熱線および測温線プローブを設置し、円柱軸と直交する鉛直面内で移動させて自然対

図 5 熱線の経時変化を考慮した較正チャート

流場の測定を行った。その際、2本のプローブは X および Z 方向の移動装置に取付けられており、マイクロコンピュータにより位置制御を行っている。なおこのときの熱線および測温線プローブ出力の処理は図1と同じ機器構成で行った。図6中破線で示した部分は、スモーク・ワイヤ法⁽⁴⁾により流れの可視化を行った際のスモーク・ワイヤの設置された状況を示したものであり、これにより熱線流速計による測定面内での速度分布を可視化した。このスモーク・ワイヤによる可視化法では直径0.1 mmのニクロム線に流動パラフィン塗布し、通電後ある時間遅れ(t)でストロボを発光させ、そのときのスモーク・ラインを35 mmカメラで撮影している。

3・2 測定結果および考察 測定は円柱中心軸からの鉛直上方距離(Z)12 mm, 13 mm, 15 mm, 17 mm, 20 mm, 25 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mmの各高さについて円柱中心軸上方($X=0$)から水平方向(X 軸方向)に25 mmの距離まで行った。その測定結果の一例を図7に示す。図7より、円柱上方の流体温度は Z の値にかかわらず $X=0$ で最大となり円柱から遠ざかるに伴い単調に下降していく。これに対して流速分布は、円柱近傍では円柱中心軸上方($X=0$)より離れた位置で最大となり円柱中心軸上方での流速は非常に小さいが、高さが増すに伴い円柱中心軸上方における流速も大きくなり、温度分布と同様に円柱中心軸上方でピークをもつ分布へと変化する。なお、同図における流速は前述の経時変化を考慮した較正曲面 $U = F_s(E^2 - E_0^2, T)$ を用いて算出した。図8に示した写真は図7の結果を確認する目的で、スモーク・ワイヤ法により円柱上方の流れ場を可視化した例である。やはり、円柱の直上近傍($Z=11$ mm)では円柱中心軸上方部において流速の小さい領域が認められる。

図7の結果から本実験で採用した円柱の加熱度の場合、円柱中心軸上方部における流速値は $Z=30$ mm

で約10 cm/s程度であると考えられるが、本報の較正方法の妥当性を検討するために、実験前後の較正(Test 2, 3)から経時変化を考慮しない較正曲面 $U = F_s(E, T)$ を作成し、同較正曲面から $Z=30$ mmにおける流速値を算出した。図9はこれらを比較した図で、図中の実線は図8($Z=30$ mm)のスモーク・ワイヤ写真から煙の自然上昇分を差し引いた流速を讀取った結果である。図9の結果から、本較正方法(経時変化を考慮)を用いて算出した流速値とスモーク・ワイヤ法によるものとはよく一致しており、また経時変化を考慮しない場合には円柱の水平方向遠方において無視できない、あるいは不自然な流速値をもつことから、本較正法の採用が妥当であったと考えられる。

なお、加熱円柱上方(Z 方向)の速度場ならびに温度場の変化状況を見やすくするために、本実験によって得られた流速および温度データ(水平方向21点、鉛直方向9点)に対し、 X および Z を変数としたスプライン補間を行うことによって円柱上方の速度分布および

図7 加熱円柱上方の流速および温度分布

図6 加熱円柱上方の自然対流場測定配置図

図8 加熱円柱上方流れ場の可視化写真

温度分布を立体的に図 10 に示した。

3・3 数値計算による検討 本研究では加熱円柱周りの自然対流場を Kuehn らと同様の方法⁽⁶⁾でハイブリッド差分⁽⁷⁾を用いて数値計算を行った。本計算結果の評価のために円柱表面の局所熱伝達率分布を数値計算結果から算出し、既報⁽¹⁾⁽⁸⁾の実験結果との比較を行った。その結果を図 11 に示しているが、実験値と本計算値はほぼ一致している。また、この計算結果から流線と等温線を示した図 12 より円柱下方および側方より流入した流れが上部に流出しブルームを形成することが確認できる。本計算によって得られた円柱上方の水平線上の速度分布を、先に示した実験結果(図 7)と比較して図 13 に示しているが、実験結果と数値計算結果は $X=0$ 付近で若干の差はあるものの、傾向的にはほぼ一致しており、水平線上の流速分布中で円柱中心軸上の流速が最大になるのは円柱からかなり上方(本実験の場合 $Z=20\text{ mm}\sim 25\text{ mm}$)であることが

確認されたといえる。以上の結果から、加熱円柱直上部($\theta=180^\circ$)近傍の流速が非常に小さくなっていることが加熱円柱の上方よみ点付近での自然対流の局所熱伝達率が非常に小さくなる(図 11)要因であると考えられる。

3・4 LDV による検討 前節の数値計算によって円柱の直上近傍において流速の小さな領域が存在することが確認されたが、さらに本研究では LDV を用いてその結果の検討を行った。ただし、供試円柱は LDV の光学系の影響をさけかつトレーサ粒子(煙)を円柱近傍上方に十分浮遊させるため内寸法 $80\times 80\text{ mm}$ 、長さ 300 mm の縦形矩形断面流路(上下端に整流網設置)内の下端から 200 mm の位置に設置されており、また LDV による流速測定は鉛直方向の速度成分(U_z)のみとした。まず、水平方向の流速成分が零であると考えられる円柱中心上方の流速測定結果を、熱線流速計による結果および数値計算結果(U_{ns} , T_{ns})と比較して図 14 に示す。図 14 より LDV による

図 9 較正法の検討およびスモーク・ワイヤ法との比較

図 11 数値計算による自然対流局所熱伝達率分布と実験値との比較

(a) 速度場

(b) 温度場

図 10 加熱円柱上方の速度場および温度場

図 12 数値計算による加熱円柱まわりの流線と等温線 ($Ra=1.7\times 10^4$)

測定結果においても円柱近傍で低流速域が認められ、熱線流速計による測定結果がほぼ妥当な値を示しているものと考えられる。図 15 は LDV による水平線上における鉛直方向の速度成分分布の測定結果を示したもので、図中に付記された実線は前節の数値計算結果によって得られた対流場の鉛直方向速度成分、破線は水平方向速度成分である。図 15 より数値計算による鉛直方向速度成分と LDV による結果とはよく一致しており、数値計算もまず満足できるものであると考えられる。また同図 $Z=30$ mm において水平方向の速度成分は数値計算結果からほとんど無視できる程度であると考えられる。 $Z=30$ mm における LDV の測定結果は図 9 中に●印で付記されているが、この結果も熱線流速計による測定結果とほぼ一致しており、これからも本研究で用いた熱線流速計の較正方法が妥当であったと考えられる。

4. 結 論

以上に述べた結果から得られた結論を以下にまとめる。

(1) 熱線流速計の温度補償を含めた較正に、二次元スプライン補間を用いることができる。また、 $U = F_s(E^2 - E_s^2, T)$ なる較正曲面を用いることで、熱線の経時変化の影響をかなり低減できる。

(2) 加熱円柱上方の水平線上の流速分布において円柱中心軸上方部の流速が円柱近傍で極小となる上昇流未発達領域が存在し、このために水平円柱軸上方部で自然対流局所熱伝達率が非常に小さくなる。

(3) Kuehn らと同様の方法を用いて本実験条件

に対する数値計算を行った結果、円柱近傍上方の流れ場に関して実験値とかなりよく一致した。

5. あ と が き

市販されている熱線流速計の出力を温度補償条件下でリニアライザに入力し調整するときのゼロサプレスは、本報の較正法の場合の $U=0$ における $T-E$ 関係を求めることに相当するが、いずれも低流速測定時には非常に重要であり慎重に行う必要がある。特にハードウェアによるリニアライザを自然対流のような流れ場に適用する場合には、熱線温度を正確に知る必要があり、また熱線の特性上リニアライズできる流速範囲に制約がある。一方、本報で用いたソフトウェアによる方法はこれらの制約は原理的にはないが、その反面計算時間を必要とするために実時間処理は困難であ

図 14 熱線流速計、数値計算および LDV による加熱円柱中心上の流速分布の比較

図 13 熱線流速計および数値計算（実線）による加熱円柱上方の流速分布の比較 ($Ra=1.7 \times 10^4$)

図 15 LDV および数値計算による加熱円柱上方鉛直方向流速分布の比較 ($Ra=1.7 \times 10^4$)

り, また較正にも多くの時間を必要とする。本研究で扱ったような流速と温度が同レベルで変化する自然対流場の場合には流速と温度を同等に扱うことが望ましいと考えられるが, 現状ではハードウェアによる方法の保証をとることが困難であるために, 定常現象に対してはソフトウェアによる方法のほうがより現実的であると思われる。なお, 著者らが以前に加熱水平円柱の自然対流に対する振動の影響を調べた際の円柱近傍上方の速度分布には円柱近傍上方で上昇流速度が小さいという現象は認められていないが⁽⁹⁾, この原因は流速測定に用いたリニアライザの温度補償時の使用条件(ゼロサプレスならびにスパン調整)に問題があつて加熱円柱上方の高温度部での温度補償が効きすぎたためであると考えられる。現在, 加熱振動円柱近傍の流速測定に関する再実験の最適方法を検討中であり, その結果は別の機会に報告させていただく予定である。

最後に, 本報の一部について熱心に議論していただいた本学の吉信宏夫, 角谷典彦両教授に謝意を表す。

文 献

- (1) Eckert, E. R. G. and Soehngen, E., *USAFTR* 5747, (1948).
- (2) Jodlbauer, K., *Forschung Ver. Dt. Ing.* 4, (1933), 158.
- (3) 市田・吉本, スプライン関数とその応用, (昭58), 80, 教育出版.
- (4) 浅沼, 流れの可視化ハンドブック, (昭52), 300, 朝倉書店.
- (5) 谷・ほか2名編, 流体力学実験法, (昭52), 174, 岩波書店.
- (6) Kuehn, T. H. and Goldstein, R. J., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 23 (1980), 971.
- (7) Patankar, S. V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, (1980), McGraw-Hill Book Company.
- (8) Fand, R. M., ほか3名., *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, 84 (1962), 245.
- (9) 角辻・ほか2名, 機論, 48-435, B (昭57), 2255.

討 論

〔質問〕 藤井 丕 夫〔九州大学生産科学研究所〕

(1) 測定対象として水平円柱直上部の速度場を選んだ特別な理由があればお伺いしたい。図14で数値解とLDVによる測定値の間に差異があるが, どちらがより正しいとお考えか。実験において温度場および速度場の二次元性は確認されておられるか。

(2) 熱線の出力の校正において, 特に低流速域(図3, $U \leq 20$ cm/s)でのデータの再現性はどの程度か。

(3) 図14において, 円柱近傍領域で $T-T_a$ の測定値と数値解との差が大きい。この領域でCTAによる測定値がLDVによる測定値に比べてかなり低くなっているのは, 熱線の校正の精度とは別に, 温度の測定誤差の影響が現れていると考えてよいか。

〔回答〕 (1) 水平加熱円柱直上部の自然対流局所熱伝達率が極小値をとることはよく知られているが, これを流れの場から実験的に検証した報告がほとんど見当たらないためこの領域に着目した。図14のLDVによる測定値そのものは周波数トラッカとスペクトルアナライザを併用して確認しており十分信頼できるものであると考えている。数値計算においては境界条件を測定条件と厳密に一致させることは難しく, 本計算では円柱半径の8倍の位置を計算上の外部境界としここにKuehnらと同様の仮定(周方向流速零, $\theta \leq 150^\circ$ で室温, $\theta > 150^\circ$ で半径方向温度こう配零)を用いている。このモデル化における近似が図14の速度

の差異となって現れたものと考えている。二次元性については, 実験的には確認していないが, 測定領域が円柱の加熱部長さ100 mmに対して円柱表面上方40 mm以内であり, また円柱中央部上方で測定を行っているため, 速度場および温度場の二次元性がほぼ保たれた領域での測定になっていると考えている。

(2) 低流速域における熱線出力の再現性については, 流体(空気)温度を変化させて確認する代わりに流体と熱線の相対温度(ΔT)を 100°C から 180°C まで 20°C 間隔で変化させ, さらに各 ΔT について流速(U)を零から50 cm/sの範囲で変化させたときの熱

付図1 供試円柱詳細図

線流速計出力と LDV で測定された流速との関係を図 1 の風洞内で調べた。その結果いずれの ΔT および U においてもデータのばらつきは流速値にして 1 cm/s 程度であった。

(3) 測温線プローブの温度校正はプローブをガラスビーカー内に入れて栓をした状態で電気炉内にセットし、プローブ全体がほぼ均一温度となるようにして行っているが、ご指摘の加熱円柱直上近傍の温度測定においてはこう配の大きな温度場中に測温線プローブが鉛直に設置されている。このために測温線リード部分の温度こう配などにより温度測定誤差を生じた可能性が強く、これによってこの領域の熱線流速計による速度測定結果も小さめに出ていると考えている。

〔質問〕 岐 美 格〔京都大学工学部〕

3・1 節における加熱円柱表面の境界条件についておたずねしたい。

電気加熱式の、この加熱円柱の表面温度は周方向に一定なのか、それとも熱流束が一定なのか。実験的に

確かめたのか。数値計算は、いかなる条件で計算しているのか。理論と実験を比較するに当たって、上述の境界条件は一致させているのか。

〔回答〕 本実験に用いた円柱の詳細を付図 1 に示す。この円柱は回転可能であり、その表面温度は Cu-Co 熱電対で測定される。また内部の加熱用ニクロムヒータはガラス細管で覆われており、このガラス管と薄肉黄銅管との間にシリコンオイルを封入した間接的な加熱を可能にしている。本実験は定常電気入力のもとで行われているが、事情によりシリコンオイルは封入されていないために供試円柱の周方向の最大表面温度差は円柱の上下表面 ($\theta=180^\circ$ と $\theta=0^\circ$) の間で $1.3\sim 1.5^\circ\text{C}$ 程度であった (オイル封入時にはこれが 0.5°C 程度になることを確認している)。したがって、供試円柱の平均表面温度 (約 55°C) に対して 3% 程度の誤差を含むことになるが、本報の数値計算においては円柱下部表面 ($\theta=0^\circ$) で実測された温度を表面温度とする等温円柱として境界条件を設定している。